

Irrige Hoffnung auf Klima-Technologien:

Die nackte Wahrheit der Entropie: Verfahren für CO₂-Entzug sind nicht nachhaltig

Das Schlüsselkriterium für Nachhaltigkeit ist die Entropie, sagt der Chemiker Bernhard Weßling. Klimawandel und Artensterben müssen gemeinsam angegangen werden.

18.12.2024, Bernhard Weßling

[Artikel anhören](#)



Fabian Strauch/dpa

Geballte Entropie: Industrielandschaft. Technologische Klimaschutzmaßnahmen sind nicht nachhaltig, wenn man nicht das gesamte System des Ressourcenverbrauchs, der Ökosysteme und Biodiversität betrachtet.

Weltweit wird eine Diskussion darüber geführt, wie der Klimawandel gestoppt werden kann und welche Technologien dabei helfen können. Im Zentrum der Diskussion stehen spezielle Filterverfahren, die „negative CO₂-Emissionen“ bewirken. Es geht dabei etwa um Kalk- und Zementindustrie, Abfallverbrennung, Landwirtschaft, Grundstoff- und Stahlindustrie, die 25 bis 30 Prozent der weltweiten CO₂-Emissionen ausmachen. Sie gelten als unvermeidbar. CO₂ soll entweder aus der Atmosphäre herausgezogen oder an

der Quelle – etwa in der Zementfabrik – aufgefangen und unterirdisch gespeichert werden. Technologien, die in diesem Zusammenhang diskutiert werden, nennen sich „Direct Air Capture“ (DAC), „Carbon Capture and Storage“ (CCS) und „Carbon Capture and Utilization“ (CCU).

Doch aus Politik, Klimaforschungsinstituten oder den Medien kommt kaum die Nachfrage, ob solche Technologien überhaupt nachhaltig sind. Wobei man zunächst fragen muss, wie man Nachhaltigkeit erfassen kann. Nachhaltigkeit für solche Verfahren würde etwa bedeuten, dass sie neben den erwarteten positiven Effekten auf das Klima keine schwerwiegenden Kollateralschäden an anderen Stellen der Umwelt auslösen dürften, indem sie etwa in Ökosystemen zur Verstärkung der ohnehin dramatischen Biodiversitätskrise beitragen.

Nachhaltigkeit ist inzwischen zu einem inhaltsleeren Mode- und Marketingbegriff geworden. Jeder darf ihn nach eigenem Gusto verwenden, es gibt keinerlei Kriterien dafür. Auch die bekannte und beliebte Brundtland-Definition von 1987, nach der die heutige Generation nicht die Möglichkeiten der späteren einschränken dürfe, entzieht sich jeder Überprüfung. Sie ist zudem rein anthropozentrisch, also auf Bedürfnisse von Menschen ausgerichtet, und selbst das nicht objektiv nachprüfbar. Umwelt und Natur spielen keinerlei Rolle.

Wir erleben Entropie täglich, unser gesamtes Leben lang

Seit dem ersten Bericht des Club of Rome („Die Grenzen des Wachstums“) hat mich die Suche nach einem Kriterium umgetrieben, das für alle Arten von Vorgehensweisen, Verfahren und Produkten verwendbar ist. Ökobilanzen sind viel zu aufwendig, zu kompliziert und oftmals nicht miteinander vergleichbar. Deshalb möchte ich im Folgenden die Entropie als ein solches allgemein verwendbares Kriterium zur Diskussion stellen. Ich habe es auf Verfahren wie DAC, CCS und CCU angewendet, um zu untersuchen, ob diese nachhaltig sind.

Was ist Entropie? Wir selbst erleben sie täglich, unser gesamtes Leben lang. Straßen und Brücken verfallen, wenn sie nicht ständig erneuert werden, Produkte aus Holz ebenso. Reifen erleiden Abrieb, der sich überall verteilt. Kleidung und Schuhe sind nach häufigem Gebrauch nicht mehr nutzbar. Kohlekraftwerke haben [einen weltweit durchschnittlichen Wirkungsgrad von 30 bis 40 Prozent](#), der Rest ist Entropie; vom Energieinhalt des Superbenzins bringt der Motor nur 20 Prozent in Form von Bewegungsenergie auf die Straße, ein Dieselmotor immerhin 45 Prozent, der Rest ist Entropie.



Oscar Sanisidro/Hessisches Landesmuseum Darmstadt

Intakte komplexe Ökosysteme verringern mit Hilfe der Sonnenenergie durch Aufbau komplexer Strukturen die Menge an Entropie und strahlen sie ab, sodass sie sich nicht auf der Erde ansammelt. Hier: sumpfiges Urzeit-Ökosystem (aus der hessischen Grube Wessel) mit einer überbordenden Artenvielfalt.

Alle Maschinen und Verkehrsmittel unterliegen Verschleiß, selbst bei bester Wartung sind sie nach wenigen Jahren nicht mehr zu gebrauchen. Ja, wir Menschen selbst haben einen Wirkungsgrad von etwa 25 Prozent, 75 Prozent des Energieinhalts unserer Nahrung scheiden wir als Entropie wieder aus, in Form von Wärme, Hautschuppen, Urin und Kot; wir werden krank, wir altern, in unseren Zellen sammeln sich Abfallstoffe, und früher oder später sterben wir.

Leider wird Entropie zumeist extrem verkürzt und irreführend als „Maß für Unordnung“ bezeichnet. In populärwissenschaftlichen Artikeln wird dann gern zur Illustration ein Blick in Kinderzimmer empfohlen. Das ist banaler Unsinn, genauso falsch wie die Vorstellung, dass Entropie immer und überall nur ansteigen kann. Denn nur in geschlossenen Systemen steigt sie bis zu einem Maximum an. Die Erde, Ökosysteme, Städte, Tiere, Pflanzen und auch wir selbst sind keine geschlossenen, sondern offene Systeme. All diese tauschen Energie und Stoffe mit ihrer jeweiligen Umgebung aus. Nur im Maßstab des gesamten Kosmos steigt die Entropie unaufhaltsam an.

Eine Tonne CO₂ aus der Atmosphäre zu holen, braucht sehr viel Energie

Die moderne Thermodynamik zeigt, unter welchen Umständen Entropie lokal sinken kann. Sie zeigt auch viel besser, was Entropie ist: und zwar minderwertige (vereinfacht gesagt: nicht mehr nutzbare) Energie. Und weil Materie auch Energie ist (Einstein: $E=m \cdot c^2$), steckt Entropie auch in minderwertiger, kaum noch nutzbarer Materie. Nutzen lässt sich diese Art minderwertiger Energie/Materie nur unter Aufwand von ziemlich viel Energie. Diese reduziert den Entropiebetrag – allerdings mit dem Effekt, dass die Gesamtmenge an Entropie steigt.

Schauen wir uns vor diesem Hintergrund die erwähnten Filterverfahren für „negative CO₂-Emissionen“ an. CO₂ selbst ist Manifestation von Entropie, denn es ist ein minderwertiger, also nur extrem schwer nutzbarer Stoff. Sobald CO₂ in die Atmosphäre entlassen wird und sich mit den übrigen Bestandteilen der Luft vermischt, wird dadurch sogenannte Mischungsentropie erzeugt. Solche Mischungsentropie entsteht, wenn sich zwei oder mehr Stoffe spontan miteinander vermischen, ähnlich wie Zucker sich von allein in Wasser auflöst.

Mit DAC beziehungsweise CCS wird also, wenn CO₂ aus der Atmosphäre oder aus Abluft herausgeholt wird, die Mischungsentropie erniedrigt. Mit einer Tonne CO₂ wird sie um 4,15 Megajoule pro Kelvin (MJ/K, also: Energieeinheit pro Grad Temperatur) verringert. Um das zu bewirken, benötigen wir rein theoretisch 1,22 Gigajoule (GJ) an Wärme, zusätzlich erhebliche Mengen an Strom. Damit erzeugt man ein Vielfaches an Entropie im Vergleich zu der Entropie-Menge, die der Atmosphäre entzogen wurde.

Der Energieaufwand, um eine Tonne aus der Atmosphäre oder aus der Abluft einer Fabrik herauszuholen, ist etwa sechsmal so hoch wie die nutzbare Energiemenge, die wir bei der Erzeugung dieser Tonne CO₂ zur Verfügung gestellt bekommen haben. Gerechtfertigt und für „nachhaltig“ erklärt wird das damit, dass die Bereitstellung der Energie durch Sonne und Wind erfolge. Das ist aber weder realistisch noch tatsächlich nachhaltig.

Die Erzeugung von „grünem“ Wasserstoff verschlimmert das Problem

Die Leopoldina, Deutschlands Nationale Akademie der Wissenschaften, forderte im April 2024, zusätzlich zur Verminderung von CO₂-Emissionen müsse der Atmosphäre auch dauerhaft CO₂ entzogen und gespeichert (endgelagert) oder genutzt werden, und zwar jährlich 60 bis 130 Millionen Tonnen. Für 100 Millionen Tonnen ergäbe das einen Primärenergiebedarf von 1600 Milliarden Joule. Das wären 15 Prozent des

Primärenergieverbrauchs Deutschlands 2023 oder gut 18 Prozent des laut Umweltbundesamt für 2030 angestrebten Primärenergiebedarfs – die für 2030 in der Berechnung nicht berücksichtigt sind und auch nicht innerhalb von fünf Jahren schnell noch zusätzlich bereitgestellt werden können, geschweige denn in Form erneuerbarer Energie.

Eigentlich müsste allein dies schon klarmachen, dass diese Verfahren alles andere als nachhaltig sind. Die regenerativen Energien wie Solar- oder Windenergie, die dafür notwendig sind, werden uns zwar ohne „Entropiekosten“ geliefert (denn ihre Bereitstellung verursacht Entropie in der Sonne). Für diese Energie müssen aber hier bei uns Solar- beziehungsweise Windkraftanlagen errichtet werden (das erfordert Rohstoff- und Energieaufwand, produziert somit Entropie). Es werden Flächen benötigt, die nicht anders genutzt werden können, schon gar nicht für natürliche Ökosysteme, und jede einzelne Anlage muss in das Stromnetz einspeisen können, was zusätzliche Infrastruktur bedeutet – weitere „Entropiekosten“.

All diese Anlagen müssen nach spätestens 30 Jahren komplett erneuert werden. Letztlich entsteht auch mit Sonne und Wind im Vergleich zur nutzbaren Strommenge mindestens das Doppelte an Entropie, also an minderwertiger Energie/Materie. Solaranlagen haben heute [einen Wirkungsgrad von gut 20 Prozent](#), Windkraftanlagen haben in der Praxis [einen Wirkungsgrad von gut 30 Prozent](#). Die Differenz zu 100 beträgt also mindestens 70 Prozent, das ist Entropie.

Da die Rückgewinnung von CO₂ bereits alles andere als nachhaltig ist (und nicht einmal ausreichend regenerative Energie dafür bereitgestellt werden kann), verschlimmert die Erzeugung von „grünem“ Wasserstoff für CCU das Problem: Hierzu würde man den regenerativ erzeugten Strom mit weiterem hohem Wirkungsgradverlust von 70 bis 82 Prozent und entsprechend massiver Entropieproduktion verwenden.

Das Schlüsselkriterium für Nachhaltigkeit ist die Entropie

Es wird oft vergessen, dass für die [elektrolytische Wasserstoffgewinnung](#) erst einmal hochreines Wasser gewonnen werden muss mit zusätzlichem Energieaufwand und somit Entropie, und zwar in Schleswig-Holstein und Mecklenburg, wo die Überschüsse an Windenergie anfallen. Dieser Strom sollte besser direkt genutzt werden, als über den Umweg „grüner Wasserstoff“ weitere hohe Verluste und somit Umweltschäden zu verursachen.

Entropie entsteht bei der Herstellung sämtlicher Produkte, beim Ablauf von Verfahren aller Art und später bei der Nutzung der Produkte. Sie zeigt sich uns in vielfältiger Form: Abfälle, Abwärme, unfruchtbare Böden, sinkender Grundwasserstand,

vergiftetes Grundwasser (und Trinkwasser können wir nur durch energieaufwendige Wasseraufbereitung bekommen, nicht mehr einfach aus einem Bach in der Nähe oder einem Brunnen im Garten), Algenpest an den Küsten aufgrund von Überdüngung, zerstörte Ökosysteme, trockengelegte Moore, dramatischer Rückgang der Artenvielfalt.

Die Komplexität des Lebens auf der Erde entsteht und wird unterhalten durch sehr viel Energieeintrag von der Sonne, es bilden sich ganz von allein sehr komplexe Ökosysteme, Strukturen und Netzwerke (lokale Entropieverminderung), und die entstehende Entropie wird von der Erde abgestrahlt. Die Entropie sammelt sich nicht auf der Erde an. Sollte dies lokal geschehen, durch Naturkatastrophen wie Vulkanausbrüche, Dürreperioden, Überschwemmungen oder den Einschlag von Asteroiden, übernimmt es die Sonne mit ihrer Energie, über Jahrtausende und Jahrmillionen hinweg wieder funktionierende komplexe Ökosysteme aufzubauen.

Solange wie es Menschen auf der Erde gibt, haben wir die Wahl, mehr oder weniger nachhaltig zu leben und zu wirtschaften. Das Schlüsselkriterium für Nachhaltigkeit ist die Entropie. Wirklich nachhaltig wäre eine Gesellschaft erst dann, wenn sie nur so viel Entropie erzeugen würde, wie zusammen mit den natürlichen Ökosystemen von der Erde abgestrahlt werden kann – wenn also keine Entropie in Form von minderwertiger Materie (Abfälle und Gifte, die funktionierende Ökosysteme zerstören) erzeugt wird. Das ist zumindest derzeit eine nicht erreichbare Utopie, weil wir unendlich viel Energie dafür benötigen. Wir können mit den heute bekannten Technologien nur nachhaltiger leben und wirtschaften, aber nicht komplett nachhaltig.

Hälfte der Weltwirtschaftsleistung hängt von intakten Ökosystemen ab

Was wäre nachhaltiger als DAC, CCS und CCU? Die Antwort liegt auf der Hand: Klimawandel und Rückgang der Artenvielfalt müssen gemeinsam angegangen werden. Wir müssen mit Maßnahmen vorgehen, die sowohl zur Klimastabilisierung wie auch zur Rettung und Wiederherstellung von Natur und Ökosystemen geeignet sind, die wir zum Überleben benötigen. Moore, Flussauen, Seegraswiesen und Mangrovenwälder müssen wiederhergestellt werden. Anstelle praktisch toter Fichtenmonokulturforste müssen Mischwälder mit offenen Lichtungen wachsen. Die industrielle Landwirtschaft muss sich umstellen auf biologische Bewirtschaftung von Äckern und Weiden, ohne chemische Dünger, ohne Pestizide – das ist nachweislich möglich, erfordert aber natürlich auch eine Umstellung der Ernährung und der Erwartungen von Konsumenten, was Preise und Verfügbarkeit von Nahrungsmitteln anbelangt.

Natürliche Ökosysteme können wesentlich mehr CO₂ im Boden speichern, als allgemein vermutet wird. Es sind nicht die schnellwachsenden Bäume in

Monokulturforsten, sondern die humushaltigen Böden, die extensiv beweideten Graslandschaften, die Moore und anderen Feuchtgebiete, die ein Vielfaches dessen, was wir Menschen an CO₂ mit Industrie, Verkehr und Haushalten emittieren, aufnehmen und in der Tiefe langzeitlagern können – wenn wir sie so arbeiten lassen, wie sie es schon immer konnten.

Das Weltwirtschaftsforum hat abgeschätzt, dass [die Hälfte der Weltwirtschaftsleistung von funktionierenden Ökosystemen abhängt](#), die andere Hälfte von Energiebereitstellung, egal welcher Art. Das allein sollte klarmachen: Verfahren wie DAC, CCS und CCU, die – wie die Entropiebilanzanalyse zeigt – weitaus mehr Schäden in der Umwelt und in den Ökosystemen anrichten werden, als sie andererseits zur Klimastabilisierung beitragen, sind nicht nachhaltig.

Bernhard Weßling ist promovierter Chemiker und Unternehmer. Er forschte zu nachhaltiger chemischer Technologie und widmete sich der modernen Thermodynamik. Zudem ist er ehrenamtlich im Umwelt- und Artenschutz aktiv sowie Investor und Mitgeschäftsführer eines großen biolandwirtschaftlichen Betriebs.